

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340122

研究課題名(和文) 海洋性島弧火山と大陸地殻生成—伊豆・小笠原弧マントルイメージングによる解明—

研究課題名(英文) Formation processes of intra-oceanic arc - mantle wedge imaging in the Izu-Bonin arc-

研究代表者

小平 秀一 (KODAIRA SHUICHI)

独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部ダイナミクス領域・チームリーダー

研究者番号：80250421

研究成果の概要(和文)：

伊豆・小笠原海洋性島弧の形成過程解明のため、既存データを用いて伊豆弧北部のマントルウェッジ構造のイメージングを行い、その結果地殻の厚い領域の下のマントル速度が低速度になっていることを明らかにした。さらに、伊豆弧南部でも同様な解析を行うため、海底地震計を用いた地震観測を実施し、データ取得を行った。

研究成果の概要(英文)：

In order to understand formation processes of an intra-oceanic arc, we performed seismic tomography for mantle wedge imaging by using existing earthquake data in the northern Izu arc. Results of mantle imaging shows that there are low velocity mantle wedge beneath areas where thick island arc crust is observed. In addition to the mantle imaging, we carried out OBS experiment to obtain new earthquake data in the southern Izu-Bonin arc.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
2009年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：島弧火山，大陸地殻，マントルイメージング

1. 研究開始当初の背景

海洋性島弧は現在の地球上において大陸地殻生成が進行している場として考えられており(例えば、Rudnick, Nature, 1995)、地球物理、地質、岩石など様々なアプローチでその検証が進められている。その中で本研究課題がすすめる海洋性島弧マントル・ウェッジ構造イメージングは、地球部地理学的データに基づきマントルから地殻への物質供給、地殻の分化・成長、地殻からマントルへの物質の回帰、など地殻とマントルの相互作用

と地殻生成に関して決定的な制約を与えると考えられる。また、統合国際深海掘削計画(IODP)では、そのイニシャル・サイエンスプランに大陸地殻生成過程の解明の為に海洋性島弧地殻掘削を掲げており、本提案によって得られる成果は、現在提案されている伊豆・小笠原弧における複合掘削プロポーザルに対する重要な地球物理学的データを提供することとなる。

2. 研究の目的

(1) 新たに明らかになった伊豆・小笠原弧における地殻形成過程のバリエーション

提案者の研究グループが推進する制御震源地震学に基づく伊豆・小笠原の地殻構造イメージから海洋性島弧地殻生成に関して幾つかの新しい発見が得られている。それによると、①孀婦岩構造線付近を境界として北部と南部で地殻の厚さが顕著に異なる、②玄武岩火山に対応して地殻の平均速度の低下が見られる、これは $V_p=6-7\text{km/s}$ を示す中部地殻が火山に対応して厚くなる事に起因する、③孀婦岩付近で地殻の厚さは顕著に異なるが、上記玄武岩火山の平均速度は北部と南部で顕著な違いは見られない、④最も地殻の発達した北部の玄武岩火山の地震波速度構造は地殻最下部高速度層 ($V_p=7.4-7.6\text{ km/s}$) を除いて、大陸の平均構造と一致する、などの特徴が挙げられる。これらの観測事実は、孀婦岩付近を境界に北部はより成熟した島弧地殻であり、南部はより未成熟な島弧地殻であることを示す。一方、島弧地殻の平均速度は地殻の平均組成と相関を示すことが知られている。この事から、より初期段階にある南部ですら、地殻の平均的組成は成熟した島弧と類似であることを示している。このような活動的な海洋性島弧の火山フロント直下の詳細構造を得えたのは研究代表者らによる伊豆・小笠原弧の研究のみであり、この地殻構造とマンテル・ウェッジ構造を統合した議論が行えれば、島弧地殻生成とマンテル物質供給に関する先駆的な研究となる。

(2) 伊豆・小笠原弧地殻における形成段階の違いを生じさせた要因に関する二つの仮説

これまでの観測事実から示唆される、島弧地殻の生成段階の違いを決定する要因は、大局的には二つの要因が考えられる。一つは、島弧地殻生成ヒストリーの違いであり、もう一つは地殻生成の為の供給物質量の違いである。湯浅他 (J. Geography, 1991) によると、伊豆・小笠原弧北部と南部では島弧形成に関わった年代が異なると提案されている。太平洋プレートの沈み込みは伊豆・小笠原弧北部で開始されたが、南部ではその後数Maにわたって横ずれ運動が続き地殻生成の為のスラブ起源の物質供給をもたらすような沈み込みは進行しなかったと考えられている。さらに、パレスベラ海盆拡大時にはその拡大軸が島弧をきるように北進し、島弧内までリフティング活動が進展したとしている。現在の孀婦岩構造線はその際に拡大軸のプロパゲーターとして提案されている。このように、沈み込み開始の遅れ、および島弧内へのリフ

ティングの拡大があったとすると、島弧地殻生成に関わる期間が短くなり、現在の物質供給とは関係なく南部が地殻生成のより初期段階にあることは説明可能である。一方、Miller et al. (EPSL, 2004) によると、遠地地震を用いた地震波トモグラフィーの結果から伊豆弧南部に沈み込むスラブに裂け目が生じていることが提案されている。もし、これが事実であれば、南部では地殻へ物質を供給するスラブが存在しないことになり、現在のトクトニック・セッティングにおいて、マンテルから地殻への供給物質の量が異なることを意味している。

(3) 仮説検証の為のマンテル・ウェッジ構造イメージング

現実には上記二つ、あるいはそれ以外の要因が複雑に関連していると考えられるが、現在のマンテル・ウェッジ構造を調べることによって、そのどちらが有意に働いて地殻生成段階の差を生じさせたかを決定することができる。マンテル・ウェッジ構造と火山活動の関係は、高精度のマンテル構造イメージングが行われている東北日本弧において重要な結果が得られている。Tamura et al. (EPSL, 2002) によると、地震波トモグラフィーによって得られたマンテル・ウェッジ低速度域は東北日本弧の第四紀の火山の分布とよい相関を示すとしている。東北日本弧では火山フロントに沿って、第四紀の火山が存在するところと火山が存在しないところが交互に現れ、それに対応するようにマンテル・ウェッジに顕著な低速度域が見られる。以上のことから、Tamura et al. (EPSL, 2002) では火山に直下でスラブからのマグマ上昇を示す高温の物質が存在し、その部分で地殻が生成されていると提案した。しかしながら、東北日本弧では火山フロントに沿った詳細な地殻構造がないこと、島弧火山活動が古い大陸地殻の上にオーバー・プリントしていることから、地殻生成過程とマンテル構造に関する議論を行われていない。一方、伊豆・小笠原弧は上述のような詳細な地殻構造が求められており、且つ生成初期段階から古い大陸地殻の影響を受けていないので、東北日本弧と類似のマンテル・ウェッジ構造イメージングが行えれば、地殻生成とマンテル・ウェッジ構造を直接的に結びつけて議論することが可能となる。

(4) 伊豆・小笠原弧におけるマグマ供給経路のイメージングと地殻成長

以上のように、島弧地殻形成過程解明にはマンテル・ウェッジ構造が決定的なデータとなる。しかしながら、伊豆・小笠原弧では、

現在までに詳細なマントル・ウェッジ構造を示した研究は行われていなかった。平成 18 年度に伊豆弧北部での地震活動把握の目的で、3ヶ月に渡る地震観測を実施した。その結果、構造イメージングに使用可能な 1600 個の地震を観測した。さらに、その初期的解析から中部地殻が厚く確認できる八丈島、青ヶ島、鳥島直下でマントル・ウェッジの低速度域が確認できている。これは、中部地殻を生成している火山の下にマントルから供給物質を示す柱状の異常構造が存在していることを示唆している。これらの結果は、3ヶ月程度の比較的短期間の地震観測であっても、マグマ供給の不均質性と地殻成長を議論できるデータが得られることを示した。

(5) 新たな観測の必要性

地殻構造イメージングから明らかになった伊豆・小笠原弧北部、南部での地殻生成のバリエーションが、現在のマントルから供給物質の量の違いを反映しているのか、島弧生成に関わる年代の違いに依存しているのかはマントル・ウェッジ構造の解明が鍵となる。もし、伊豆弧北部・南部のマントル・ウェッジ構造が非常に類似のものであれば、少なくとも現在の伊豆弧ではマントルから地殻への供給量に大きな違いがないと考えられる。したがって、島弧生成過程の歴史の違いが南北の地殻生成差異を生じさせた主要因と推定できる。一方、東北日本で見られたような火山下マントルで低速度帯が北部でより顕著で南部で不明瞭もしくは小規模であった場合は、南北でマントルから地殻への供給量の違いが存在すると推定できる。

上記の問題に決着をつけるには、伊豆弧北部で実施したものと同様な地震データを用いたマントル構造イメージングを行う必要がある。そのためには、遠地地震による伊豆・小笠原弧の地震カタログと北部で実施した地震観測の結果を検討し、伊豆南部で空間的、時間的にどの適度の海底地震観測を実施すべきか検討を行った後に、鳥島より南部での海底地震観測を実施する必要がある。

3. 研究の方法

(1) 平成 20 年度

①伊豆弧北部での海底地震観測データに基づくマントル・ウェッジ構造イメージング

提案者のグループでは平成 18 年度に、伊豆弧での地震活動度把握の為、海底地震計 40 台を使用した 3ヶ月間の地震観測を実施した。この観測では、予想よりはるかに多くの地震を記録することができた。現在までに構造イメージングに用いる地震の選択とその震源決定が終了し、地震波伝播速度構造のイメー

ジング、及び散乱帯分布のイメージングの初期的解析を行っている。その結果、火山の分布に対応するマントル・ウェッジ低速度異常や散乱帯分布が得られている。平成 20 年度はこれらの解析を進め、マントル・ウェッジの地震波伝播速度構造と散乱帯分布イメージの統合的解釈を行う。なお、地震波伝播速度構造イメージングには Kamiya and Kobayashi (2000) では彼らの開発した地震波トモグラフィーの方法を応用し、トモグラフィーの初期モデル作成においては、観測領域で得られている、島弧縦断方向、横断方向の 2次元地殻構造データを統合してモデルを作成する。散乱帯分布イメージングには高橋 (2005) による高周波地震波の波形エンベロープからランダムな速度揺らぎスペクトルの空間分布を求める方法を応用する。その結果からは、火山の下のマントル・ウェッジ内にメルトを含むクラックや流体の存在を示唆する結果が期待される。

②伊豆弧北部における海洋性島弧地殻生成・改変に関する地球物理データと岩石学的データの統合解釈

伊豆弧北部では玄武岩の火山の間に流紋岩の火山が分布するバイモーダルな火山活動が知られている (Tamura et al. 2002)。岩石学的には流紋岩火山は地殻内を移動した玄武岩マグマによる島弧中部地殻の再溶解の可能性が示唆されている。もし、その提案が正しければ、玄武岩火山のみがマントル・ウェッジからのマグマ供給を受けることになる。言い換えると、玄武岩火山のみがマントル・ウェッジ内に根を持つ構造をしていることが予想される。そこで、本提案では伊豆弧北部の地震波速度構造および散乱構造イメージングと岩石学的研究と統合し解釈するとことによって、海洋性島弧での火山活動の原因とそれに伴う地殻生成過程・改変過程に関するモデルを提案する。

③伊豆弧南部におけるマントル・ウェッジ構造イメージングの為の分解能評価

前述のように火山に対応する地殻構造変化が得られた伊豆・小笠原弧の火山フロントにそった地殻構造とマントル・ウェッジ構造との関連を評価するのが本研究の目的である。そこで、上記で得られた伊豆・小笠原弧北部のマントル・ウェッジ構造と同様な空間的分解能が得られる観測を実施する必要がある。そのためには、地震活動の模擬データを作成し期待される分解能をチェッカー・ボードテスト等により評価する必要がある。しかしながら、伊豆・小笠原弧南部での地震観

測を行った研究はまだない。そこで、遠地地震による地震カタログと伊豆・小笠原弧北部で海底地震観測によって得られた地震活動を比較することによって、地震カタログの何倍程度の地震が現地観測で期待できるかを見積もる。

(2) 平成21, 22年度

伊豆・小笠原弧南部での海底地震観測及び地震活動評価

平成20年度の分解能評価によって決定された観測点密度、観測期間で伊豆・小笠原弧南部を対象として地震観測を実施する。観測領域は伊豆・小笠原弧北部での観測に隣接する領域を設定し、連続した構造イメージが得られるようにする。分解能評価の結果にもよるが現在のところ北部での観測と同規模の観測を見込んでいる。観測には海洋研究開発機構所有の短周期海底地震計40台を投入する。観測期間は観測機器の仕様により最大6ヶ月を予定している。なお、地震計の設置・回収に関する航海は海洋研究開発機構の深海調査研究航海の公募、もしくは海洋研究開発機構の所内研究に関するシップタイムの利用申請を行う(主担当 小平、高橋(努))。更に、平成21年度内には、上記観測によるデータから観測領域の地震活動を把握するため詳細な震源決定まで解析を進める(主担当 尾鼻)。

平成22年度

マントル構造イメージングと海洋性島弧地殻生成過程と地殻・マントル相互作用に関するモデル作成

初年度と同様な方法を伊豆・小笠原弧南部で得られたデータに適応し、地震波速度構造、不均質構造のイメージングを行う。これにより伊豆弧全体のマントル・ウェッジ構造が得られることになる。

上記研究により得られるマントル・ウェッジ構造と提案者のグループが推進する伊豆弧の詳細な地殻構造イメージ(小平、高橋(成)実施)と岩石学的研究(田村実施)を統合して、地殻の生成過程の違いを決定している要因を明らかにする。もし、その違いがマントル・ウェッジ内に存在するメルト・流体分布に起因している場合は、そのメルト・流体を生成した可能性のある沈み込む太平洋プレートの構造についても検討する。特に、岩石学的研究から海洋プレート上の海山・海

台の有無がメルト・流体生成の不均質性を決めているという提案もされている為、近年構造探査研究によって急速に明らかになりつつある小笠原海台周辺の構造変化等を検討する。

4. 研究成果

(1) 平成20年度

平成18年度に伊豆弧で実施した海底地震観測のデータを用いてマントル構造イメージングを行った。この結果、マントル・ウェッジ内低速度域のセグメント化が確認され、この分布が地殻の大局的構造変化に対応していることを明らかにした。しかしながら、このマントル低速度域は火山一つ一つに対応する地殻構造変化による長波長の構造変化を示し、いくつかの火山を一つにグループとして取り込むように分布していることが分かった。これは、地殻構造イメージと本研究結果の空間的分解能の違いに起因する可能性もあるが、マントル域の低速度異常域が浅部(火山)に向けて枝分かれしている可能性も示唆する。この点は検討課題である。一方、散乱帯イメージングには高周波地震波の波形エンベロープからランダムな速度揺らぎスペクトルの空間分布を求める方法を応用した。その結果からは、火山フロントに沿ってマントル構造不均質性と対応する散乱イメージが得られた。マントル構造イメージと島弧地殻形成過程の統合を進めるため、既存地殻構造探査データを基に火山フロントから背弧域にかけて島弧に沿った地下構造変化の解明を進めた。その結果、伊豆弧と四国海盆の境界域において古島弧地殻と考えられる地殻の存在を確認し、それらが現在の火山フロント下地殻と類似の構造変化をしていることを明らかにした。これは、古島弧が火山フロントから分離する以前から現在と同様に玄武岩火山下での島弧地殻形成が進んでいたことを示し、その空間的分布がほとんど変化していないことを示唆している。

(2) 平成21年度

平成18年度に伊豆弧で実施した海底地震観測のデータを用いてマントル地震波速度構造イメージングの取りまとめを行い、論文を投稿した。主な結論としては、①マントル・ウェッジ内の低速度帯のセグメント化を確認したが、その分布は中部地殻の厚さの変化(即ち、火山分布)には直接的には対応しておらず、むしろ地殻構造全体の長波長の構造変化に対応し、いくつかの火山を一つのグループとして取り込むように分布している

ことが分かった、②前弧域にもいくつかの低速度帯が確認された、これは前弧域に存在する古島弧の地殻の分布に対応しているように見える。また、散乱構造（短波長の速度構造の揺らぎ）に関する結果も論文として取りまとめ、投稿準備中である。

これらの結果をもとに、南部伊豆小笠原弧での地震観測網の検討を行い、9月に海洋研究開発機構海洋調査船「かいよう」を用いて海底地震計40台の設置航海を実施した。その後、3か月の観測を行い、12月末「かいよう」により40台の地震計全数の回収を完了した。平成21年度はそれらのデータの整理を行い、自動処理による地震活動全体像の把握を行った。その結果、南部伊豆小笠原弧でも上記平成18年度観測以上の地震活動があることが確認され、データ取得は本科研費研究の成否に関わる重要な部分であったが、十分当初目標を達成できた。

(3) 平成22年度

北部伊豆小笠原弧における海底地震計(OBS)観測によって得られたデータを用いた地震波トモグラフィの結果からマントルウェッジの不均質構造と島弧の地殻成長の空間的不均質の関連を示し、その成果を論文として取りまとめた[Obana et al., 2010]。さらに、伊豆・小笠原弧の南北における地殻生成の差異の原因を明らかにするため、伊豆・小笠原弧南部で実施した海底地震観測のデータ解析を進めた。観測では2009年9月下旬の海洋調査船「かいよう」KY09-08航海において、約45km間隔で40台の海底地震計を設置し、10月1日より収録を開始した。全てのOBSが2009年12月の「かいよう」KY09-10航海で回収され、内38台で約3ヶ月間の連続記録が得られた。解析には海底地震計の記録に加えて、防災科学技術研究所によって運用されているF-netの八丈島、青ヶ島および父島の地震計の記録も用いた。一次元構造を用いて行った震源決定によると、伊豆小笠原海溝から沈み込む太平洋プレートに沿った地震活動が明瞭に示されており、深さ70kmから150kmにかけて二重深発地震面を確認することが出来る。また深さ300kmより深部では、深発地震の発生面が北から南にかけて急傾斜になっている。一方、火山フロント周辺の深さ20-30kmでは、所々に地震活動が活発な領域が存在している。得られたデータを用いて南部伊豆小笠原弧のマントルウェッジ構造について、今後更に検討を行う。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件) すべて査読有

①Takahashi, T., Obana, K., Kodaira, S., Suetsugu, D., Takahashi, N., Kamiya, S.,

and Tamura, Y., Random inhomogeneities in the northern Izu-Bonin arc estimated by tomographic inversion of peak delay times of S wave seismograms, *J. Geophys. Res.*, AGU, 116, doi:10.1029/2010JB007691, 2011.

②Obana, K., Kamiya, S., Kodaira, S., Suetsugu, D., Takahashi, N., Takahashi, T., and Tamura, Y., Along-arc variation in seismic velocity structure related to variable growth of arc crust in northern Izu-Bonin intraoceanic arc, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 11, doi:10.1029/2010GC003146, 2010.

③Tamura, Y., Ishizuka, O., Aoike, K., Kawate, S., Kawabata, H., Chang, Q., Saito, S., Tatsumi, Y., Arima, M., Takahashi, M., Kanamaru, T., Kodaira, S., and Fiske, R. S., Missing Oligocene Crust of the Izu-Bonin Arc: Consumed or Rejuvenated During Collision?, *J. Petrol.*, 51, 823-846, doi:10.1093/petrology/egq002, 2010.

④Kodaira, S., Noguchi, N., Takahashi, N., Ishizuka, O., and Kaneda, Y., Evolution from fore-arc oceanic crust to island arc crust: A seismic study along the Izu-Bonin fore arcs, *J. Geophys. Res.*, 115, doi:10.1029/2009JB006968, 2010.

⑤小平秀一, 日本周辺沈み込み帯での海域地下構造探査, *地震*, 61, 155-163, 2009.

⑥Takahashi, N., Kodaira, S., Tatsumi, Y., Yamashita, M., Sato, T., Kaiho, Y., Miura, S., No, T., Takizawa, K., and Kaneda, Y., Structural variations of arc crusts and rifted margins in the southern Izu-Ogasawara arc-back arc systems, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, doi:10.1029/2008GC002146, 2009.

⑦ Tamura, Y., Gill, J. B., Tollstrup, D., Kawabata, H., Shukuno, H., Chang, Q., Miyazaki, T., Takahashi, T., Hirahara, Y., Kodaira, S., Ishizuka, O., Suzuki, T., Kido, Y., Fiske, R. S., and Tatsumi, Y., Silicic Magmas in the Izu-Bonin Oceanic Arc and Implications for Crustal Evolution, *J. Petrology*, 50, 685-723, doi:10.1093/petrology/egp017, 2009.

⑧Kodaira, S., Sato, T., Takahashi, N., Yamashita, M., No, T., and Kaneda, Y., Seismic imaging of a possible paleoarc in the Izu-Bonin intraoceanic arc and its

implications for arc evolution processes, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9, doi:10.1029/2008GC002073, 2008.

[学会発表] (計9件)

① Takahashi T. et al., Intrinsic absorption structure of S-wave in the northeastern Japan and northern Izu-Bonin arc, *American Geophysical Union*, 2010/12/15, San Francisco.

② Takahashi N. et al., Crustal structure and growth of the Izu-Bonin-Mariana arc, *Western Pacific Geophysical Union*, 2010/6/24, Taipei.

③ Kodaira, S. et al., Result of active-source seismic imaging in Izu-Bonin intra-oceanic arc and its implications for arc evolution, *Japan Geoscience Union*, 2010/5/26, 幕張メッセ.

④ Kodaira, S. et al., Forearc oceanic crust in the Izu-Bonin arc - new insights from active-source seismic survey -, 2009 AGU Fall meeting, 2009/12/16, San Francisco.

⑤ Takahashi, N. et al., Crustal rifting and magmatic underplating in the Izu-Ogasawara (Bonin) intra-oceanic arc detected by active source seismic studies 2009 AGU Fall meeting, 2009/12/16, San Francisco

⑥ Tamura, Y. et al. The Missing Oligocene Izu-Bonin Arc Crust: Consumed or Rejuvenated During Collision?, 2009 AGU Fall meeting, 2009/12/16, San Francisco.

⑦ Obana, K. et al. Seismic velocity structure variation along northern Izu-Bonin arc, 2009 AGU Fall meeting, 2009/12/16, San Francisco.

⑧ Kodaira, S. et al., Seismological constraints on crustal formation processes in the Izu-Bonin intra-oceanic subduction zone, 2008 AGU Fall meeting, 2008/12/16, San Francisco.

⑨ Kodaira, S. et al., Crustal formation process and mass transfer in the Izu-Bonin subduction factory revealed by active-passive seismic studies, 2008 EGU general assembly, 2008/4/15, Vienna.

[図書] (計1件)

① Narumi Takahashi et al., Springer, *Rifting structure of central Izu-Ogasawara (Bonin) arc crust: Results of seismic crustal imaging, Accretionary Prisms and Convergent Margin Tectonics in the Northwest Pacific Basin*, 2011. 75-95.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小平 秀一 (KODAIRA SHUICHI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・チームリーダー
研究者番号：80250421

(2) 研究分担者

高橋 成実 (TAKAHASHI NARUMI)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス研究領域・技術研究主幹
研究者番号：70359131

尾鼻 浩一郎 (OBANA KOICHIRO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・研究員
研究者番号：10359200

高橋 努 (TAKAHASHI TSUTOMU)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・研究員
研究者番号：90435842

田村 芳彦 (TAMURA YOSHIHIKO)
独立行政法人海洋研究開発機構・地球内部
ダイナミクス領域・チームリーダー
研究者番号：40293336